

Distortion Analysis and 3-D Modeling of Magnetotelluric Data  
in the Southern Central Andes

---

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
im Fachbereich Geowissenschaften  
an der Freien Universität Berlin

Pamela Lezaeta

Berlin, 2001

Tag der Disputation: 13 Februar 2001

Erster Gutachter: Prof. Dr. V. Haak

Zweiter Gutachter: Prof. Dr. H.-J. Götze

# Abstract, Kurzfassung, Resumen

This thesis describes a distortion analysis and modeling of magnetotelluric (MT) and deep geomagnetic sounding (GDS) data of the Southern Central Andes. The data was collected during several field campaigns between 1995 and 1999, within the framework of the German Collaborative Research Programme SFB267 "Deformation Processes in the Andes". The measurements were carried out in the forearc and magmatic arc regions of the subduction zone, covering an area about 200 km long (W-E) and 60 km wide (N-S).

Three dimensional (3-D) electrical conductivity models of the crust are required to explain the data measured, which are found to be strongly affected by current channeling and magnetic distortion effects, manifested in impedance phases above  $90^\circ$ . Understanding the source of the distortion has been possible by applying to the MT data a method of current channeling analysis developed in this thesis, based on the boundary conditions that the electric field fulfills at a conductivity contrast. This analysis allows a qualitative recognition of the main 3-D high conductivity anomalies, thus serving as *a priori* information for the construction of the 3-D forward models.

The method developed here for recognizing current channeling and hence the existence of elongated conductors in the crust has been seen useful to apply in shear zones, especially when the strike of the faults is different from that of a regional conductivity structure.

Two mega-fault systems oriented sub-parallel to the coast line ( $\sim$ N-S), composed of strike slip faults associated with the oblique subduction of the Nazca plate underneath the South American plate, are identified as highly conductive zones.

Salinary and/or ore fluids circulating in the fractures of a brittle crust is a plausible explanation for the conductivity enhancement detected in the Atacama and Precordillera fault system, given also the low geotherms ( $<300^\circ\text{C}$ ), the low seismic attenuations and the evidence of crustal seismicity.

The clearly higher conductivity values to the north of latitude  $21^\circ\text{S}$  than to the south at depths of 10-30 km beneath the Precordillera fault system are suggested as being due to a distinct concentration of fluids which are produced by metamorphic reactions that may have evolved under different P-T conditions from north to south, considering the different age of volcanic activity known at these latitudes ( $21^\circ\text{S}$ ). An additional explanation is that in the north, where magmatism is older ( $>25$  Ma) than in the south ( $<10$  Ma), the crust might be more fractured due to a cooler and more brittle regime than in the south, allowing the fluids

to be better interconnected and hence the electrical conductivity to be enhanced.

In the Altiplano high-plateau a high conductivity zone (HCZ;  $<2 \Omega\text{m}$ ) is encountered below 20 km depth extending to the west to the beginning of the Western Cordillera (the Recent magmatic arc), and is interpreted as partial melting. The HCZ strikes NNW-SSE, similar to the bending of the volcanic arc.

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Verzerrungsanalyse und Modellierung magnetotellurischer (MT) und geomagnetischer Tiefensondierungsdaten (GDS) aus den Südlichen Zentralen Anden. Die Messkampagnen zur Erhebung der Daten wurden in den Jahren 1995 bis 1999 im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 267 "Deformationsprozesse in den Anden" durchgeführt. Das Messgebiet erstreckt sich über den Forearc-Bereich und den magmatischen Bogen der Andinen Subduktionszone und bedeckt dabei eine Fläche von ca. 200 km Länge (W-E) und 60 km Breite (N-S).

Aufgrund von Impedanzphasen über  $90^\circ$ , die auf das Kanalisieren von Strömen ("current channeling") und magnetische Verzerrungseffekte schließen lassen, sind dreidimensionale (3-D) elektrische Leitfähigkeitsmodelle notwendig, um die gemessenen Daten erklären zu können. Die in dieser Arbeit entwickelte Methode der "current-channeling-Analyse" basiert auf den Eigenschaften (Randbedingungen) des elektrischen Feldes an Leitfähigkeitskontrasten. Durch ihre Anwendung auf die MT-Daten trägt sie zum Verständnis der Ursachen (Quellen) der Verzerrung bei. Sie ermöglicht die qualitative Erkennung von 3-D Leitfähigkeitsanomalien und liefert somit *a priori* Informationen zur Erstellung des 3-D Modells.

Die hier entwickelte Methode zur Erkennung von current channeling und der damit verbundenen Existenz von langen Leitern in der Kruste erweist sich als geeignet für Bereiche mit Scherzonen, insbesondere bei unterschiedlicher Streichrichtung von Störung und regionaler Leitfähigkeitsstruktur.

Zwei große Störungssysteme werden als hochleitfähige Zonen identifiziert. Sie verlaufen nahezu parallel ( $\sim$ N-S) zur Küstenlinie und setzen sich aus Blattverschiebungen zusammen, die in Verbindung mit der schrägen Subduktion der Nazca-Platte unter die Südamerikanische Platte stehen.

Salz- bzw. mineralhaltige Fluide, die in den Störungsflächen der spröden Kruste zirkulieren, sind eine mögliche Erklärung für die erhöhte Leitfähigkeit in den Atacama- und Präkordilleren-Störungssystemen. Sie wird desweiteren belegt durch niedrige Temperaturen ( $<300^\circ\text{C}$ ), eine geringe seismische Dämpfung und die Existenz krustaler Seismizität in diesem Gebiet.

Die deutlich höheren Leitfähigkeitswerte nördlich von 21 südlicher Breite, in 10 bis 30 km Tiefe unterhalb des Präkordilleren-Störungssystems lassen auf eine Veränderung der Fluidkonzentration von Süd nach Nord schließen. Da das Alter des Vulkanismus von Süd ( $<10$  Ma) nach Nord ( $>20$  Ma) zunimmt, könnten die P-T Bedingungen unterschiedlich gewesen sein, unter denen Fluide durch metamorphe Reaktionen freigesetzt worden sein könnten.

Eine weitere Erklärung des krustalen NS-Leitfähigkeitsgradienten wäre die Annahme, dass die Kruste nördlich von 21°S aufgrund des älteren Vulkanismus kühler und damit spröder und stärker zerklüftet ist, so dass Fluidbahnen besser verbunden sind und somit die elektrische Leitfähigkeit erhöht wird.

Eine Zone erhöhter Leitfähigkeit (HCZ;  $<2 \Omega\text{m}$ ) unterhalb der Altiplano-Hochebene in einer Tiefe von 20 km, die sich bis zur Westkordillere (rezenter magmatischer Bogen) erstreckt, deutet wahrscheinlich auf partielle Schmelzen hin. Sie verläuft ähnlich zum magmatischen Bogen in NNW-SSE Richtung.

## Resumen

Esta tesis describe un análisis de distorsión y modelado basados en datos magnetoteléuticos (MT) y de sondaje geomagnético profundo obtenidos en los Andes Centrales del Sur. Los datos fueron medidos en diferentes campañas de terreno realizadas entre 1995 y 1999 como parte del proyecto especial de investigación SFB 267 "Procesos de deformación en los Andes". El área de medición comprende la región del antearco y del arco volcánico de la zona Andina de subducción, cubriendo un área de aproximadamente 200 km de largo (O-E) y de 60 km de ancho (N-S).

Modelos tri-dimensionales (3-D) de conductividad eléctrica cortical son requeridos para explicar los datos medidos, los que se han visto estar distorsionados por efectos de canalización de corriente eléctrica como también por efectos magnéticos, manifestado en fases de impedancia sobre 90°. La comprensión de la fuente de distorsión ha sido posible gracias a la aplicación a los datos MT de un método de análisis de canalización de corriente desarrollado en este trabajo. Este método se basa en las condiciones de borde que cumple el campo eléctrico en una zona de contraste de conductividad. El análisis permite un reconocimiento cualitativo de anomalías de conductividad 3-D y por tanto ha servido como información *a priori* para la construcción de modelos 3-D.

El método desarrollado en esta tesis para reconocer canalización de corriente eléctrica y en consecuencia identificar conductores elongados en la corteza se ha visto ser útil de aplicar en zonas de fallas, especialmente cuando éstas se orientan diferentemente con respecto a una estructura regional de conductividad.

Dos sistemas de mega-fallas orientados sub-paralelamente a la línea costera ( $\sim$ N-S) se identifican con zonas de elevada conductividad eléctrica. Estos sistemas están compuestos por fallas transcurrentes asociadas a la subducción oblicua de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

Fluídos salinos y/o mineralizados circulando por las fracturas de una corteza frágil parecen explicar la elevada conductividad detectada en las zonas de falla Atacama y Precordillera. Dicha interpretación está sustentada por las bajas temperaturas ( $<300^\circ\text{C}$ ) y bajos valores de atenuación sísmica obtenidos en la región, además de la evidencia de sismicidad cortical.

Los valores de conductividad obtenidos bajo la Precordillera a los 10-30 km de profundidad

son claramente mayores al Norte que al Sur de los 21°S. Se sugiere que esta variación de conductividad en N-S se deba a una concentración distinta de fluidos producidos por reacciones metamórficas. Las distintas concentraciones de fluidos pueden estar sujetas a condiciones de P-T diferentes de Norte a Sur, considerando la conocida diferencia de edad del volcanismo a los 21°S. Una explicación adicional puede ser que en el Norte, donde el volcanismo es más antiguo (>20 Ma) que al Sur (<10 Ma), la corteza esté allí más fracturada debido a un régimen más frágil y frío comparado con la corteza del Sur, permitiendo de esta manera que los fluidos estén mejor interconectados produciendo así un aumento en la conductividad eléctrica.

En el Altiplano se extiende hacia el Oeste hasta el comienzo de la Cordillera Occidental (el arco magmático Reciente), una zona de elevada conductividad (HCZ;  $<2 \Omega\text{m}$ ). Esta zona se encuentra bajo los 20 km de profundidad y ha sido interpretada como zona en estado de fusión parcial. Dicha HCZ se desvía en el Norte hacia el Nor-Oeste, similar a la curvatura que el arco magmático sigue en esta región.

# Contents

<b>Abstract, Kurzfassung, Resumen</b>	<b>3</b>
<b>Introduction</b>	<b>12</b>
<b>1 Theoretical Background</b>	<b>15</b>
1.1 Principles of Magnetotellurics and Geomagnetic Deep Soundings . . . . .	15
1.1.1 Magnetotellurics . . . . .	17
1.1.2 Geomagnetic Deep Sounding . . . . .	20
1.2 Dimensionality and distortion of the transfer functions . . . . .	21
1.2.1 Introduction . . . . .	21
1.2.2 The impedance Eigenvalues for a 2-D model . . . . .	23
1.2.3 Telluric and magnetic galvanic distortions . . . . .	24
1.2.4 Skew parameters of dimensionality . . . . .	25
1.2.5 Telluric tensor decomposition . . . . .	26
1.2.6 Telluric and magnetic tensor decomposition . . . . .	28
<b>2 Confidence limit of the magnetotelluric phase sensitive skew</b>	<b>30</b>
2.1 Probability function of skew . . . . .	33
2.2 Examples with synthetic and field data . . . . .	36
<b>3 Geological Background</b>	<b>40</b>
3.1 Coastal Cordillera and Atacama fault . . . . .	42

3.2	Precordillera . . . . .	44
3.3	Western Cordillera and Altiplano . . . . .	46
3.4	Nitrate deposits in the forearc . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Presentation of the study area</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>Dimensionality analysis of the data</b>	<b>54</b>
5.1	The phase sensitive skew parameter . . . . .	55
5.2	Determination of regional 2-D strike . . . . .	57
5.2.1	Telluric tensor decomposition . . . . .	58
5.2.2	Telluric and magnetic tensor decomposition . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Current channeling distortion analysis</b>	<b>65</b>
6.1	Presentation of the theory . . . . .	66
6.1.1	A complex matrix of the galvanic telluric and magnetic distortions . . . . .	70
6.1.2	Relation with the telluric tensor decomposition . . . . .	71
6.1.3	The model affected by current channeling . . . . .	72
6.1.4	The distorted tensor of the channeling model . . . . .	75
6.1.5	Impedance in the regional coordinate system . . . . .	78
6.1.6	Channeling model of sub-parallel conductivity structures . . . . .	79
6.1.7	Regional strike and regional 2-D tensor determination . . . . .	80
6.1.8	3-D induction strength . . . . .	81
6.1.9	Local azimuth . . . . .	82
6.1.10	Channeling misfit . . . . .	82
6.2	Example with synthetic data . . . . .	83
6.3	Analysis in the measured area . . . . .	89
6.3.1	Regional strike determination . . . . .	89
6.3.2	3-D image of the distortion . . . . .	89



6.3.3	Local azimuth . . . . .	95
6.3.4	Conclusions . . . . .	97
<b>7</b>	<b>The distortion effect in the Coastal Cordillera</b>	<b>99</b>
7.1	A qualitative 3-D model for the Coastal Cordillera . . . . .	102
7.2	Model interpretation . . . . .	110
7.3	The 2-D approach in the Coastal Cordillera . . . . .	111
<b>8</b>	<b>The 3-D distortion effect in the Precordillera</b>	<b>115</b>
8.1	The magnetic distortion in the MT data . . . . .	116
8.2	3-D thin sheet modeling . . . . .	118
8.3	Model interpretation . . . . .	122
8.4	Summary of the 3-D distortion effect . . . . .	125
<b>9</b>	<b>Regional 2-D modeling</b>	<b>126</b>
9.1	Investigation of the ocean effect . . . . .	126
9.1.1	Coupling effect . . . . .	129
9.1.2	Induction arrows subtracted from the ocean effect . . . . .	132
9.2	Investigation of sensitivity to the regional structures . . . . .	134
9.2.1	2-D inversion: Can we see the slab? . . . . .	134
9.2.2	The Precordillera conductor . . . . .	137
9.2.3	Alternative models for Pica and Ancorp profiles . . . . .	141
<b>10</b>	<b>3-D modeling of the Southern Central Andes</b>	<b>144</b>
10.1	The Atacama fault zone . . . . .	146
10.2	The Pre- and Western Cordillera . . . . .	150
10.3	Discussion and outlook . . . . .	155
<b>11</b>	<b>Interpretation of the conductivity models</b>	<b>159</b>

11.1 A deep or a shallow source of the fluids in the Atacama fault? . . . . .	159
11.2 Precordillera Fault system . . . . .	163
11.3 Magmatic arc - Altiplano . . . . .	165
<b>Summary</b>	<b>169</b>
<b>Bibliography</b>	<b>172</b>
<b>Acknowledgments</b>	<b>179</b>
<b>Curriculum Vitae</b>	<b>180</b>

<b>Appendix</b>	<b>181</b>
<b>A Probability function of the regional skew</b>	<b>181</b>
<b>B Channeling model</b>	<b>183</b>
B.1 Analogies with the telluric tensor decomposition . . . . .	183
B.1.1 The equivalence of the twist and shear telluric parameters . . . . .	184
B.1.2 The maximal shear value . . . . .	186
B.2 Tensor rotation from the regional coordinate system to the local azimuth . . .	187
B.3 Parameters estimation in the Channeling model . . . . .	188
B.3.1 3-D induction strength and frequency independent strike angle . . . . .	188
B.3.2 Local azimuth . . . . .	189
B.3.3 Frequency dependent strike angle . . . . .	190
B.3.4 Channeling misfit . . . . .	191
<b>C Expected value of the apparent resistivity</b>	<b>192</b>
<b>D Expected value of the impedance phase</b>	<b>195</b>

# Curriculum Vitae

## Personal Data

Name: Pamela Lezaeta  
Born: 25/07/70 in Chile

## Education

1976-1988 Villa Maria Academy school  
1989-1993 Bachelor in geophysical Sciences, Universidad de Chile  
1994-1995 M.Sc. in geophysics, Universidad de Chile

## Professional Experience

Codelco  
01-06 /1992 Santiago, Chile. Honorary service,  
exploration department.  
Geodatos  
01-02 /1993 Santiago, Chile.  
Practical work. Air magnetic and geoelectrical measurements.

## MT Data collection within the PhD thesis work

01/99  
Measurements in the Southern Central Andean Cordillera (Iquique and Pica),  
supervised by Dr. Brasse, FU Berlin, Special Research Project "Deformation  
processes in the Andes". Data processing in Calama.  
10 /97 - 12 /97  
Measurements in the Bolivian Altiplano high plateau, supervised by Dr. Brasse,  
FU Berlin, Special Research Project "Deformation processes in the Andes". Data  
processing in Uyuni.

## **Erklärung**

Hiermit versichere ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken wörtlich oder inhaltlich entnommen sind, wurden durch entsprechende Angaben der Quellen kenntlich gemacht.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.